

Ю Н. Логинов, В.Д. Соловей, В. В. Котов

УРАВНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ

г. Екатеринбург, ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ», Институт машиноведения УрО РАН

Из металлов, обладающих гексагональной решеткой, наибольшее распространение в промышленности получили магний и титан, а полуфабрикаты и изделия из них в большом ассортименте изготавливаются производственными комплексами Урала. В связи с этим на кафедре обработки металлов давлением УГТУ-УПИ постоянно проводятся исследования, направленные на изучение свойств этих материалов [1-5], создание и усовершенствование [6] технологий их обработки.

Наличие гексагональной кристаллической решетки в металле создает предпосылки для получения заведомо анизотропных свойств, поскольку велика вероятность ее ориентации в определенном направлении.

Для описания деформации анизотропных металлов с изотропным упрочнением наиболее широкое распространение получило условие текучести Хилла [7,8], которое выглядит следующим образом:

$$H(S_{xx} - S_{yy})^2 + F(S_{yy} - S_{zz})^2 + G(S_{zz} - S_{xx})^2 + 2N \cdot S_{xy}^2 + 2L \cdot S_{yz}^2 + 2M \cdot S_{zx}^2 = 1, \quad (1)$$

где $S_{ij}(i, j = x, y, z)$ – компоненты девиатора напряжений, H, F, G, N, L, M – параметры анизотропии, которые можно определить по формулам:

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{Tx}^2} + \frac{1}{\sigma_{Ty}^2} - \frac{1}{\sigma_{Tz}^2} \right); G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{Ty}^2} + \frac{1}{\sigma_{Tz}^2} - \frac{1}{\sigma_{Tx}^2} \right); F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{Tz}^2} + \frac{1}{\sigma_{Tx}^2} - \frac{1}{\sigma_{Ty}^2} \right); \quad (2)$$

$$N = \frac{1}{2\tau_{Txy}^2}; L = \frac{1}{2\tau_{Tyz}^2}; M = \frac{1}{2\tau_{Tzx}^2}, \quad (3)$$

Как и в случае изотропного материала для нахождения механических характеристик материала потребуется проведение опытов с той разницей, что опыты придется провести, испытывая материал не в одном направлении, а в нескольких. Это в большой степени затрудняет оценку свойств материала, например, для испытания на растяжение придется вырезать стандартные образцы из полуфабриката, имеющего большую протяженность в одном направлении и малую протяженность в двух других направлениях. В результате размер полуфабриката может оказаться меньше требуемой длины образца. Именно поэтому в работах [2-5] было предложено применять образцы в форме кубиков, которые легко переориентировать в пространстве, а испытания проводить не на растяжение, а на осадку. Однако такие опыты также довольно трудоемки, кроме того, их недостаток заключается в резком уменьшении базовой длины образца, что приводит к потере точности измерений. Поэтому актуальной задачей является сокращение количества измерений характеристик анизотропного материала.

Из теории пластичности известны приемы решения краевых задач, в которых не требуется полного описания всех компонент, входящих в полную систему дифференциальных уравнений механики деформации сплошной среды. В частных случаях постановки задач удастся избавиться от тех компонент, определение которых требует приложения больших трудозатрат. На основе этой идеи было принято решение рассмотреть частные случаи применения условия Хилла (1) и, по возможности сократить количество экспериментов для определения характеристик деформируемого материала.

Для материалов, обладающих ГПУ-решеткой, можно допустить ориентацию большинства кристаллов вдоль одного из направлений обработки давлением, что создает возможность упрощения условия текучести.

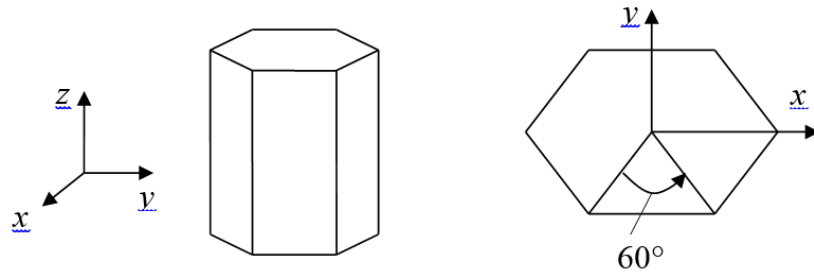


Рис. 1. Эскиз кристаллита ГПУ решетки: а – общий вид кристаллита с системой координат, б – иллюстрация поворота призмы вокруг оси симметрии

Титан и α -сплавы на его основе являются материалами с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой, кристаллиты которой представляет собой призму, в основании которой находится правильный шестиугольник (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что кристаллит в направлении оси z имеет симметрию шестого порядка, а направлениях осей x, y – симметрию второго порядка. Следует отметить, что при повороте призмы вокруг оси z на угол 60° или вокруг любой из осей x и y на угол 180° ее грани занимают первоначальное положение. В дальнейшем производили перерасчет компонентов девиатора напряжений при повороте системы координат по формуле

$$S_{ij} = a_{ii'} a_{jj'} S_{i'j'}, \quad (4)$$

где $a_{ii'} (i, i' = x, y, z)$, $a_{jj'} (j, j' = x, y, z)$ - направляющие косинусы.

При повороте системы координат вокруг оси x на 180° получим

$$S_{xx} = S_{x'x'}, S_{xy} = -S_{x'y'}, S_{xz} = -S_{x'z'}, S_{yy} = S_{y'y'}, S_{yx} = -S_{y'x'}, \quad (5)$$

$$S_{yz} = S_{y'z'}, S_{zz} = S_{z'z'}, S_{zx} = -S_{z'x'}, S_{zy} = S_{z'y'}. \quad (6)$$

Полученные результаты преобразований согласуются с тремя очевидными положениями:

1. Нормальные составляющие тензора напряжений при повороте на 180° остаются прежними.
2. Касательные составляющие, содержащие в индексах x , должны поменять знак.
3. Справедлив закон парности касательных напряжений.

Аналогичные результаты получены при повороте системы координат вокруг оси y на 180° :

$$S_{xx} = S_{x'x'}, S_{xy} = -S_{x'y'}, S_{xz} = S_{x'z'}, S_{yy} = S_{y'y'}, S_{yx} = -S_{y'x'}, \quad (7)$$

$$S_{yz} = -S_{y'z'}, S_{zz} = S_{z'z'}, S_{zx} = S_{z'x'}, S_{zy} = -S_{z'y'}. \quad (8)$$

При повороте системы координат вокруг оси z на 60° получили следующие результаты:

$$S_{xx} = \frac{1}{4} S_{x'x'} + \frac{3}{4} S_{y'y'} - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{x'y'}; \quad S_{xy} = \frac{\sqrt{3}}{4} S_{x'x'} - \frac{\sqrt{3}}{4} S_{y'y'} - \frac{1}{2} S_{x'y'}; \quad (9)$$

$$S_{xz} = \frac{1}{2}S_{x'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{y'z'}; S_{yy} = \frac{3}{4}S_{x'x'} + \frac{1}{4}S_{y'y'} + \frac{\sqrt{3}}{2}S_{x'y'}; \quad (10)$$

$$S_{yx} = \frac{\sqrt{3}}{4}S_{x'x'} - \frac{\sqrt{3}}{4}S_{y'y'} - \frac{1}{2}S_{x'y'}; S_{yz} = \frac{1}{2}S_{y'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{x'z'}; \quad (11)$$

$$S_{zz} = S_{z'z'}; S_{zx} = \frac{1}{2}S_{x'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{y'z'}; S_{zy} = \frac{1}{2}S_{y'z'} - \frac{\sqrt{3}}{2}S_{x'z'}. \quad (12)$$

Полученные результаты позволяют получить систему уравнений взаимосвязи между параметрами анизотропии:

$$L = M; F = G; N = 2H + F \quad (13)$$

С учетом этого уравнение (1), связывающее компоненты девиатора, преобразуется к виду:

$$H(S_{xx} - S_{yy})^2 + F(S_{yy} - S_{zz})^2 + F(S_{zz} - S_{xx})^2 + \\ + 2(2H + F) \cdot S_{xy}^2 + 2L \cdot S_{yz}^2 + 2L \cdot S_{zx}^2 = 1, \quad (14)$$

или для компонент тензора напряжений:

$$H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + \\ + 2(2H + F) \cdot \sigma_{xy}^2 + 2L \cdot \sigma_{yz}^2 + 2L \cdot \sigma_{zx}^2 = 1. \quad (15)$$

Как видно из последних выражений, удалось сократить количество параметров уравнения Хилла с 6 до 3 (это параметры H , F , L), т.е. двукратно упростить как возможную процедуру решения, так и уменьшить количество экспериментов, необходимых для определения констант материала. В частных случаях количество востребованных для решения параметров может оказаться еще меньше, что показано ниже. В условиях одноосного напряженного состояния получим при ориентации оси призмы (рис.1): вдоль оси z (рис.1) $F = \frac{1}{2\sigma_{zz}^2}$; вдоль оси x $H + F = \frac{1}{2\sigma_{xx}^2}$; вдоль оси y $H + F = \frac{1}{2\sigma_{yy}^2}$.

Таким образом, при одноосном нагружении, располагая образец, имеющий одну из осей параллельную оси призмы, в ортогональных направлениях можно определить два из трех параметров анизотропии (H и F). При этом, если для реального процесса деформации нет необходимости в определении компонента L , то краевая задача может быть решена. Именно эта методика была использована для описания анизотропных свойств магния [2] и одного из титановых сплавов [3-5].

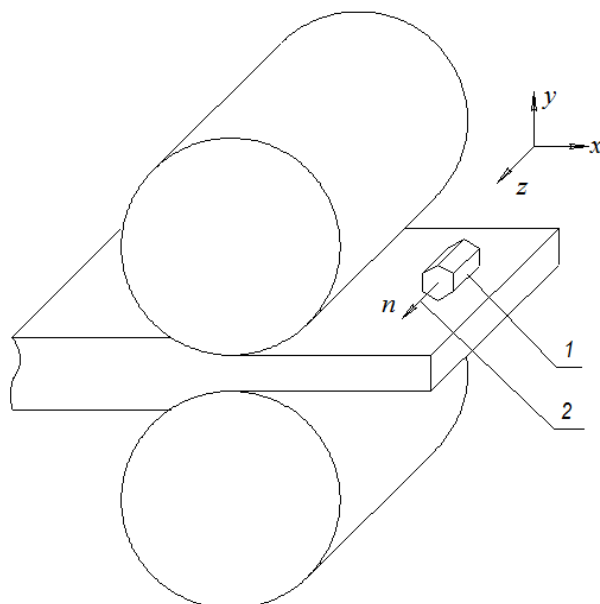


Рис. 2. Один из вариантов плоской прокатки: 1 – кристаллит ГПУ решетки, 2 – направление нормали к базовой плоскости

При плоском деформированном состоянии, характерном, например, для прокатки листа, и при расположении нормали к базовой плоскости перпендикулярно направлению прокатки (рис. 2) получим

$$\left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 \right] = \frac{2}{2H + F}. \quad (16)$$

Для этого случая также оказалось достаточно знания двух параметров анизотропии H и F . Можно показать, что при иной ориентации базовой плоскости потребуется измерить параметр L .

Таким образом, применение упрощающих процедур, учитывающих ориентацию кристаллической решетки, позволяет выполнить некоторые расчеты деформации текстурованного материала, не прибегая к измерению всех параметров анизотропии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов Ю.Н., Пышминцев И.Ю., Попов А.А., Лунина Т.Г. Свойства прессованного гранулированного магниевого сплава со сверхмелкозернистой структурой. Известия вузов. Цветная металлургия, 1998, №6. С.41-44.
2. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств. Известия вузов. Цветная металлургия, 1999, №6. С.42-46.
3. Loginov Yu.N., Smirnov V.G., Kotov V.V. Rheological characteristics of extruded tube from GRADE 9 titanium alloy. Stainless steel world, 2006, v.18. PP.51-55.

4. Логинов Ю.Н., Котов В.В. Анизотропия свойств титанового сплава. Вестник ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005, №13(65). С.187 - 189.
5. Логинов Ю.Н., Смирнов В.Г., Котов В.В. Особенности реологических характеристик прессованных труб из титанового сплава GRADE 9. В сб.тр.1 Росс. конф. «Кузнецы Урала-2005», Екатеринбург, 2005. С.55-66.
6. Буркин С.П., Логинов Ю.Н., Разинкин А.В., Сапунжи В.В. Высокопроизводительная технология изготовления магниевых заготовок под закрытую штамповку. Кузнечно-штамповочное производство, 2001, №1. С.11-15.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400с.